

Der Einfluß von Temperatur- und
Lageänderungen des Unterarmes auf die
reaktive Hyperämie der Unterarmmuskulatur.
Untersuchungen mit der Methode
der integrierten Kapillardruckmessung
nach Schroeder

von

GERHARD HAPPEL

Frankfurt 1962

Aus dem Institut für animalische Physiologie der Universität
Frankfurt am Main
(Direktor: Prof. Dr. K. Wezler)

DER EINFLUSS VON TEMPERATUR- UND LAGEÄNDERUNGEN DES UNTER-
ARMES AUF DIE REAKTIVE HYPERÄMIE DER UNTERARMMUSKULATUR.
UNTERSUCHUNGEN MIT DER METHODE DER INTEGRIERTEN KAPILLAR-
DRUCKMESSUNG NACH S C H R O E D E R .

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin
der hohen medizinischen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt/Main

vorgelegt von
Gerhard Happel
aus Frankfurt am Main

Frankfurt am Main, den 15.6.62



Dekan: Prof. Dr. W. Krücke
Referent: Prof. Dr. W. Schroeder
Korreferent: Priv. Doz. R. Heinecker
Mündliche Prüfung: 17.10.1962

A. Einleitung

Mit dem Aufheben einer kurz dauernden arteriellen Durchblutungssperre kommt es in dem abhängigen Gewebe zu einer vorübergehenden Durchblutungssteigerung, welche als reaktive Hyperämie bezeichnet wird. Die Größe, d.h. die Dauer und das Ausmaß der Durchblutungssteigerung wird allgemein als Maß für die Größe der Durchblutungsnot während der arteriellen Sperre angesehen, da die reaktive Hyperämie bei gleicher Dauer der Sperre in einem tätigen Organ mit hohem Durchblutungsbedarf größer als in einem ruhenden Organ ist. Als Maß für den normalen Durchblutungsbedarf wird man die Durchströmung der nutritiven Kapillaren ansehen müssen, während die Gesamtdurchblutung, welche aus methodischen Gründen bisher allein in der Muskulatur gemessen worden ist, noch die Durchströmung der Kurzschlußgefäße einschließt.

Wenn die reaktive Hyperämie nur ein Nachholbedarf der nutritiven Gefäße ist, sollte sie unter sog. Grundumsatzbedingungen immer gleich groß sein, mit der Gewebetemperatur zu- oder abnehmen und bei den Extremitäten von Lageänderungen derselben unabhängig sein. Durch die vorliegende Dissertation sollte die Richtigkeit dieser Hypothese mit einer Methode geprüft werden, welche praktisch nur die Durchblutungsänderungen in den nutritiven Gefäßen erfaßt.

Die reaktive Hyperämie ist ein komplexes Geschehen und es sind wahrscheinlich mehrere Faktoren an der Auslösung der reaktiven Hyperämie beteiligt. B a y l i s s (2) hatte 1902 als auslösende Ursache der Gefäßerweiterung eine Herabsetzung des transmuralen Arteriendruckes bezeichnet. Er hatte festgestellt, daß die Arterienwand auf eine Spannungserhöhung mit einer Kontraktion (barynogene Kontraktion) und auf eine Spannungsminderung mit einer Dilatation antwortet. Es soll sich hierbei um eine rein myogene Reaktion handeln, weil sie nicht nur am denervierten Präparat, sondern auch an isolierten Gefäßen ausgelöst werden kann (Bayliss 2; Folkow 8,9)

H o o k e r (18) zeigte 1912, daß unter Sauerstoffmangel stehende Arterienabschnitte sich erweitern, und er nahm an, daß der O_2 -Mangel eine wichtige Bedeutung für das Auftreten einer reaktiven Hyperämie habe.

Die nach Durchblutungsdrosselung eintretenden Durchblutungssteigerungen wurden ferner durch die Bildung gefäßerweiternder Substanzen zu erklären versucht (L e w i s 21; H e s s 17; R e i n und S c h n e i d e r 26; R e i n 27-30). Unter diesen Substanzen sind alle jene im Gewebsstoffwechsel entstehenden Stoffe zu verstehen, die eine direkte oder auch lokalreflektorische Gefäßwirkung haben.

B l a i r , G l o v e r und R o d d i e (3) konnten zeigen, daß eine reaktive Hyperämie nicht unbedingt erforderlich ist, um die Mangeldurchblutung während der Drosselungs-

zeit zu kompensieren; eine reaktive Hyperämie tritt nämlich nicht ein, wenn nach Aufheben der vollständigen Drosselung der Blutstrom durch manuelle Kompression der Arterien nur teilweise freigegeben wurde.

R a n d a l l und H o r v a t h (25) haben Beziehungen zwischen Drosselungsdauer und Größe der reaktiven Hyperämie zu finden versucht. Dabei maßen sie die Durchblutung mit einem elektromagnetischen Strömungsmesser in der Carotis- oder Femoralisarterie des Hundes. Sie kamen zu dem Ergebnis, daß bereits bei einer Drosselungsdauer von 60 Sek. der größte Wert der reaktiven Hyperämie erreicht wurde. Die Dauer der reaktiven Hyperämie währte auch bei Drosselungszeiten von 5 Min. höchstens 45 Sek.!!

G o l e n h o f e n und H i l d e b r a n d t (12), die bei ihren Versuchen als Meßorte die Wadenmuskulatur und die Brachioradialis-Extensorengruppe des menschlichen Unterarmes wählten, fanden mit der Wärmeleitsonde nach H e n s e l , daß nach einer Durchblutungs-drosselung die Ruhedurchblutung sich in Form einer periodisch gedämpften Schwingung einstellt, wobei sie die der 1. Phase nachfolgenden Durchblutungsminde-rung (2.Phase) und die darauffolgende zweite Mehrdurchblutung (3.Phase) als Nachwelle bezeichneten. Der gesamte Durchblutungsverlauf wurde von ihnen als "Drosselungsreaktion" bezeichnet.

G o l e n h o f e n und H i l d e b r a n d t (12) fanden für das Maximum der reaktiven Hyperämie Drosselungszeiten

von 4-8 Min.; ferner wurde eine Abhängigkeit zwischen dem Ablauf der Drosselungsreaktion und dem Ruhedurchblutungswert des Muskels festgestellt. Bei hoher Ruhedurchblutung war der Flächenwert häufig negativ, er wurde erst mit zunehmender Drosselungsdauer positiv. Bei niedriger Ruhedurchblutung beobachtete man bereits nach kurzen Drosselungszeiten positive Flächenwerte.

Für die Größe der Flächenwerte machten G o l e n h o f e n und H i l d e b r a n d t lokal-chemische Faktoren verantwortlich, während sie die periodischen Einschwingungsvorgänge als myogene Reaktion nach B a y l i s s (2) sowie F o l k o w (8;9) erklärten.

Der Einfluß der lokalen Gewebetemperatur auf die reaktive Hyperämie scheint bisher nur von C o l e s und C o o p e r (4) untersucht worden zu sein. Diese Autoren fanden mit der Venenverschlußplethysmographie am Vorderarm eine Abnahme der reaktiven Hyperämie nach Kühlung der Extremität in Wasser von 12°.

Der Einfluß von Lageveränderungen auf den Ablauf der reaktiven Hyperämie nach Durchblutungs-drosselung scheint bisher noch nicht untersucht worden zu sein.

B. M e t h o d i k

Zur Messung der Durchblutung der Extremität Muskeln sind mehrere Methoden entwickelt worden, deren Prinzip und Anwendung kurz dargestellt werden soll.

a) Die Venenverschlußplethysmographie an Wade und Unterarm ist das älteste Verfahren zur Registrierung der Muskeldurchblutung (L e w i s und G r a n t (22); G r a n t und P e a r s o n (14)). Die zu untersuchende Extremität, z. B. der Unterarm, wird luftdicht in einen Metall- oder Glaszylinder eingeschlossen, und es werden dessen Volumenänderungen mit Hilfe einer M a r e y 'schen Kapsel registriert. Jede Vermehrung der Blutmenge im Vorderarm erhöht sein Volumen und verdrängt eine entsprechende Luftmenge zur M a r e y 'schen Kapsel. Quantitativ wird die Extremitätendurchblutung auf folgende Weise gemessen: Nach Unterbrechung des venösen Abflusses durch eine Staumanschette (Staudruck 70 mmHg) am Oberarm oder Oberschenkel muß die Zunahme des Extremitätenvolumens für einige Sekunden dem arteriellen Zustrom entsprechen. Die Venenverschlußplethysmographie kann aber nur die Durchblutung des gesamten eingeschlossenen Gewebes in $\text{cm}^3/100\text{cm}^3/\text{min.}$ messen, d. h. es wird gleichzeitig mit der Muskel- auch die Hautdurchblutung erfaßt.

b) Das Verfahren der Muskel-"Clearance" mittels eines Radioisotopes, wurde von K e t y (19;20) angegeben und geht davon aus, daß die Geschwindigkeit, mit der ein intramuskulär injiziertes Radioisotop (Na^{24} oder J^{131}) wieder abtransportiert wird, Rückschlüsse auf die Muskeldurchblutung erlaubt. Der Abtransport wird mit einem G e i g e r - M ü l l e r Zählrohr verfolgt.

Gegen diese Methode sind zahlreiche Einwände erhoben worden, weil für den Abtransport einer kristalloiden Substanz aus dem Muskel außer der Durchblutungsgröße noch zahlreiche andere Faktoren verantwortlich sind; so die Druck- und Permeabilitätsverhältnisse in den Kapillaren, der Lymphstrom wie der Rückfluß der Substanz durch den Einstichkanal. (H e n s e l 16). Es konnte zwar gezeigt werden, daß sich der Abtransport des injizierten Radioisotopes mit der Durchblutung ändert, doch konnte keine Proportionalität zwischen diesen Größen festgestellt werden (K e t y 19; M i l l e r und W i l - s o n 24; M c G i r r 23).

K e t y (19) fand, daß nach 10 Minuten arterieller Drosselung der "Clearancewert" von Na^{24} im M.gastrocnemius gegenüber dem Ruhewert sich nur etwa verdoppelte, während die Durchblutung auf das 6-7 fache des Ruhewertes anstieg.

c) Die in den letzten Jahren von H e n s e l und R u e f (15) entwickelte Methode der örtlichen Durchblutungsmessung des menschlichen Muskels, stellt eine Weiterentwicklung des G i b b s 'schen (11) geheizten Thermoelementes dar. Bei der von Hensel und Ruef entwickelten Methode wird die örtliche Wärmeleitzahl λ des Muskels gemessen. λ errechnet sich aus der Gleichung

$$\lambda = K \frac{I^2}{T}$$

wobei I die Heizstromstärke eines punktförmigen geheizten Körpers im Gewebe, T dessen Übertemperatur gegenüber der Um-

gebung und K eine empirisch zu ermittelnde Eichkonstante darstellt.

Die Wärmeleitsonde besteht aus einer 60 mm langen vorn zuge-löteten Kanüle von 0,9 mm Außendurchmesser. Im Inneren der Kanülenspitze befindet sich ein elektrisches Heizsystem, das mit konstantem Wechselstrom geheizt wird, und ein thermoelek-trisches Meßsystem, das die Temperaturdifferenz zwischen der Kanülenspitze und einem 10 mm entfernten Punkt im Kanülen-schaft ermittelt. Die Sonde wird nach Anästhesie der Haut möglichst parallel zur Hautoberfläche in den Muskel einge-führt. Sie wird auf $2-3^{\circ}\text{C}$ Übertemperatur aufgeheizt.

Die Versuche zeigten, daß die Wärmeleitzahl mit dem Zeitvo-lumen der Durchblutung zunächst steil und dann immer flacher ansteigt.

Bei Untersuchungen der reaktiven Hyperämie entsprachen die Ergebnisse dieser Methode denjenigen der Venenverschlußple-thysmographie. (H e n s e l 16).

Der Nachteil dieser Methode ist darin zu erblicken, daß im-mer nur ein Gewebsabschnitt von 1cm^3 erfaßt wird; daraus er-gibt sich, daß die Ergebnisse sehr von der jeweiligen Lage der Sondenspitze abhängen, je nachdem ob sie in einem Muskel-interstitium, einem gut durchbluteten Muskelgebiet oder in der Nähe eines größeren Gefäßes gelegen ist.

d) Die Methode der integrierten Kapillardruckmessung nach S c h r o e d e r . (35)

Mit dieser Methode werden nicht Durchblutungs- sondern Druck-

änderungen in den Kapillaren gemessen, da in der Masse der Kapillaren die Druckänderungen den Durchblutungsänderungen proportional sein müssen. Diese bei den eigenen Untersuchungen angewandte Methode erlaubt mit relativ geringem Aufwand Durchblutungsänderungen in der Masse der Kapillaren fortlaufend zu erfassen.

Die Druckänderungen wurden auf indirektem Wege nach Ausschaltung der Gefäßwandspannung ermittelt. Hierzu wurde das Gewebe des zu untersuchenden Unterarmes durch ein Metallband (Einzelheiten s. später) unter einen Druck von 35mm Hg gesetzt (= obere Kapillardruckhöhe). Durch diesen "Entlastungsdruck" wird die Wand der Kapillaren entspannt, so daß Druckänderungen in diesen Gefäßen sich jetzt durch die entspannten Gefäßwände und das Gewebe auf einen im Metallband befindlichen Druckmesskopf übertragen und fortlaufend registriert werden können.

Durch den Entlastungsdruck müssen gleichzeitig aber auch alle Gefäße mit niedrigerem Innendruck (Venolen, Venen) verschlossen werden, wenn sich nicht, da die Blutströmung anhält, der Venendruck sofort an den Kapillardruck angleichen würde.

Durch die Einstellung eines bestimmten Entlastungsdruckes wird das Gesamtvolumen aller Gefäße und damit auch der mittlere Querschnitt (bei Annahme einer konstanten Gefäßlänge) der Kapillaren und Venen, deren Innendruck den Entlastungsdruck von 35mmHg unterschreitet, auf einen bestimmten Leitfähigkeitswert (reziproker Strömungswiderstand) gebracht.

Dieser Leitfähigkeitswert kann, unter der Voraussetzung, daß das Volumen der zu untersuchenden Extremität unveränderlich ist, als konstant angesehen werden. Bei konstantem mittlerem Querschnitt oder konstanter Leitfähigkeit muß bei einer Durchblutungssteigerung (durch Arteriolenenerweiterung) der Druck in den Kapillaren mit der Stromstärke linear proportional ansteigen.

Es ist nicht vermeidbar, daß bei der angewandten Methode auch die Gefäßreaktionen in der die Muskulatur bedeckenden Haut mit in die registrierten Druckänderungen eingehen. Da bei den Extremitäten die Gefäßmasse in der Muskulatur aber ein Vielfaches derjenigen in der Haut beträgt (1:7 - 1:8, C o o - p e r und Mitarbeiter 7) kann die Anzeige einer veränderten Muskeldurchströmung bei gleichzeitig entgegengesetzter Reaktion der Hautgefäße lediglich quantitativ nicht aber qualitativ beeinflusst werden. Außerdem werden im Vergleich zur Muskelmasse nur relativ kleine Hautbezirke miterfaßt. Im Gegensatz hierzu werden durch die Venenverschlußplethysmographie die Reaktionen in den Gefäßen der gesamten den Extremitätenabschnitt zirkulär umschließenden Haut mit aufgezeichnet, wenn die Hautgefäße nicht durch eine gleichzeitige Adrenalinelektrophorese funktionell ausgeschaltet werden (H e n s e l 16).

Beschreibung der Meßanordnung (s. Abb. 1)

Die 1959 angegebene Pelotte zur fortlaufenden Registrierung des integrierten Kapillardruckes konnte von S c h r o e d e r inzwischen weiterentwickelt bzw. vereinfacht werden. Sie be-

steht aus einem 5 cm breiten und 0,1 mm dicken Metall-(Bronze) band (1) mit pneumatischem Druckmeßkopf. Das Metallband wird ringförmig um das obere Drittel des Unterarmes (13) gelegt und durch Schrauben (2) angezogen, bis durch den Meßkopf ein Druck von 35 mm Hg angezeigt wird.

Die gesamte Meßanordnung besteht aus einer Druckluftflasche mit Druckminderer (eingestellt auf 100 mm Hg), dem Strömungswiderstand, der Pelotte mit dem Druckmeßkopf und dem optischen Manometer.

Die Druckluft strömt von dem Druckminderer (3) zum Strömungswiderstand (4) (durch den der Luftdurchfluß auf etwa 1 L/min. eingestellt wird) zum Druckmeßkopf(5) der Pelotte bzw. über ein T-Stück zum optischen Manometer (6). Der Druckmeßkopf hat einen spaltförmigen Raum, in den die Luft durch einen Einlaßstutzen (7) ein- und durch eine Austrittsöffnung (8) (0,15mmØ) wieder ins Freie tritt. Armwärts ist der spaltförmige Raum durch eine spannungslose Kunststoffmembran (9) abgeschlossen. Durch Druck auf die Kunststoffmembran wird der Luftabstrom gedrosselt, so daß der Druck in den zuführenden Schläuchen ansteigt. Die Dimensionen des Druckmeßkopfes sind so gewählt, daß der Druck in der Luftleitung linear proportional zum Druck auf die Kunststoffmembran (Gewebedruck) ansteigt. Die Druckänderungen in der Luftleitung werden durch das optische Manometer gemessen bzw. mit Hilfe eines Photokymographions aufgezeichnet.

Das optische Manometer ist durch eine Gummimembran verschlossen, welche bei Drucksteigerungen eine Blattfeder (10) durchbiegt. Die Bewegungen dieser Feder werden über einen Faden auf einen Spiegel (11) übertragen, dessen Drehachse ein doppelter aufgedrehter Perlonfaden bildet. Durch Verschieben des Spiegelträgers in der Perlonfadenachse kann die Empfindlichkeit des Manometers kontinuierlich geändert werden. Die Bewegungen des Spiegels werden optisch durch ein Photokymographion registriert. An die Schlauchleitung ist weiter ein Windkessel (12) von 1 l Inhalt zur Dämpfung (Verkleinerung) der pulsatorischen Druckwellen angeschlossen, weil nur die Änderungen des Mitteldruckes ausgewertet werden.

Vor jedem Versuch wurde die Meßanordnung statisch geeicht, indem mit Hilfe einer M a r e y 'schen Kapsel auf den pneumatischen Druckmeßkopf Drucke von 35, 40 und 45 mm Hg ausgeübt und gleichzeitig die Ausschläge des optischen Manometers registriert wurden.

Die Unterbrechung der Blutzufuhr erfolgte am Oberarm (14) mit einer Blutdruckmanschette (15), die von einer zweiten Druckluftflasche mit Druckminderer (16) über einen Zweigegehahn (17) auf einen Druck von 180 mm Hg gebracht wurde. Um eine möglichst schnelle Unterbrechung der Blutzufuhr zu erreichen, war zwischen Druckminderer und Zweigegehahn ein Druckspeicher (18) von 10 l eingeschaltet.

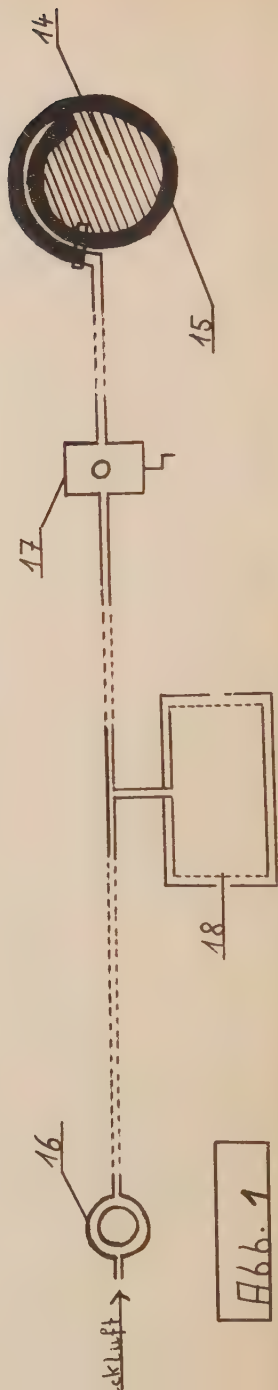
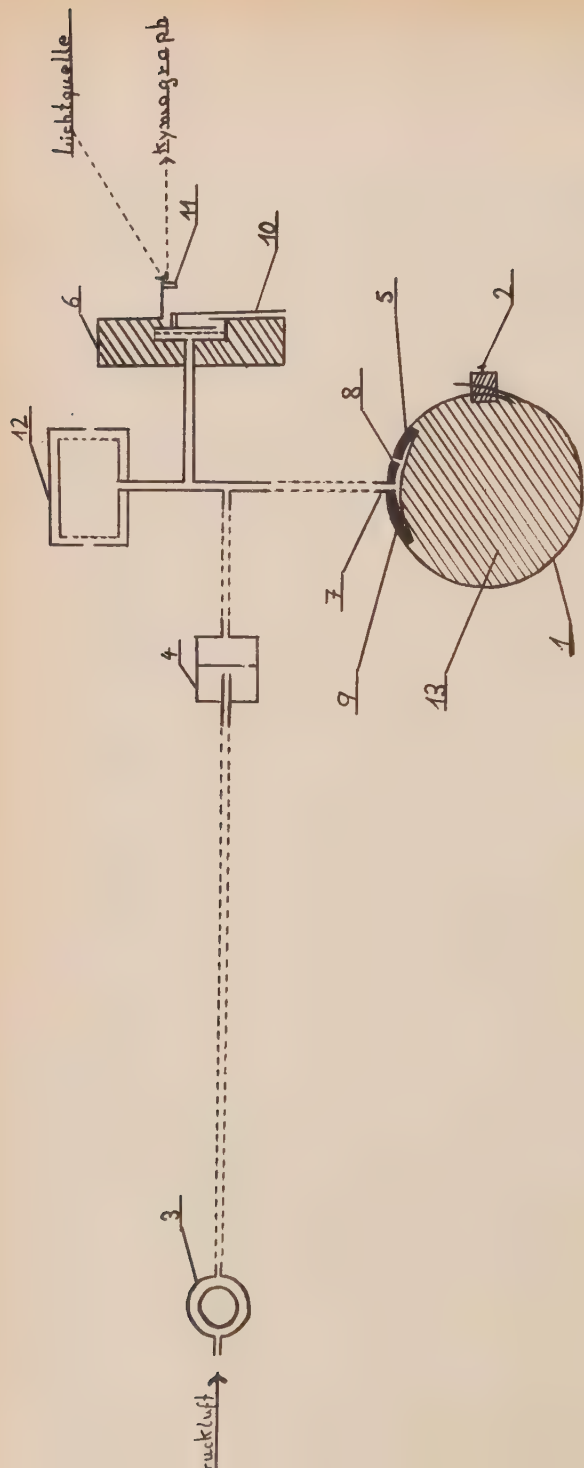


Abb. 1

Beschreibung der Versuchsanordnung

Zunächst wurden "Normalversuche" durchgeführt, bevor der Einfluß von Temperatur- und Lageänderungen auf die reaktive Hyperämie untersucht wurde. (s. Abb. 2) Alle Versuche wurden an zwei männlichen gesunden Versuchspersonen (H. und J.) vorgenommen. Die Versuchsperson saß möglichst bequem auf einem Stuhl, während der zu untersuchende Arm waagrecht und entspannt in Herzhöhe auf dem Untersuchungstisch lag. Nun wurde die Oberarmmanschette und im oberen Drittel des Unterarmes die Meßpelotte angelegt. Letztere wurde so weit angezogen, bis im pneumatischen Überträgersystem ein Druck von 35 mm Hg angezeigt wurde. Wenn dieser "Entlastungsdruck" nach einigen Minuten konstant blieb, konnte die Untersuchung beginnen und das Kymographion angestellt werden. Nach 1 Minute wurde die Oberarmmanschette für 3 Minuten unter den Kompressionsdruck von 180 mm Hg gesetzt. Nach Lösen der Durchblutungssperre wurde die Registrierung bis zum Erreichen des Ausgangsdruckes von 35 mm Hg fortgesetzt.

Zunächst waren Drosselungszeiten von 1, 2, 3 und 4 Minuten untersucht worden. Später stellte sich jedoch heraus, daß der Druckabfall erst bei einer Drosselungsdauer von 3 Minuten seinen tiefsten Wert erreichte, bei längeren Drosselungszeiten aber nicht mehr wesentlich absank. Daher wurden in allen Untersuchungen Drosselungszeiten von 3 Min. verwendet.

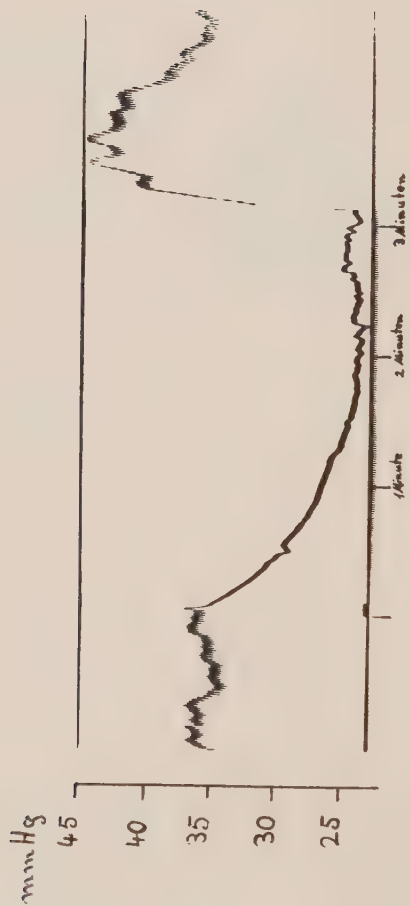


Abb. 2

Bei den Versuchen mit örtlicher Temperaturveränderung lag der zu untersuchende Arm ebenfalls waagerecht auf dem Untersuchungstisch und wurde von oben gleichmäßig mit kaltem (12°) oder warmem (47°) Wasser berieselt. Um eine genügende Tiefenwirkung zu erzielen, wurde der Arm etwa 20 Minuten auf die beschriebene Weise gekühlt bzw. erwärmt, bevor die erste Messung vorgenommen wurde.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Armlage auf die reaktive Hyperämie hing der völlig entspannte Arm entweder senkrecht nach unten oder er wurde mittels einer Schlinge senkrecht nach oben gehalten.

C. E r g e b n i s s e

An den registrierten Druckkurven wurde ermittelt:

1. Die Zeit vom Beginn der Drosselung bis zum Erreichen des maximalen Druckabfalles
2. Der maximale Druckabfall in mm Hg
3. Der maximale Druckanstieg in mm Hg nach Aufheben der Drosselung
 - a) vom Ausgangswert
 - b) vom niedrigsten Wert der Vorperiode aus gemessen
4. Die Zeit von der Unterbrechung der Drosselung bis zur Rückkehr des Druckes auf den Ausgangswert.

Die Kurven wurden für die beiden Versuchspersonen getrennt ausgewertet und die erhaltenen Ergebnisse in den Tabellen 1-11 zusammengestellt.

1. Die reaktive Hyperämie bei waagerechter Armlage und Zimmertemperatur. (Normalversuche)

a) Versuchsperson H. (Tabelle 1, Abb. 3)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 12,4 mm Hg mit einem mittleren Fehler des Mittelwertes (M) von $\pm 0,87$ mm Hg. Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 128 Sek. ($M = \pm 7,5$) erreicht. Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 10,7 mm Hg ($M = \pm 0,82$); gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 23,1 mm Hg ($M = \pm 1,14$). Der Ausgangsdruck wurde bei ei-

nem Mittelwert von 124 Sek. ($M = \pm 10,8$) wieder erreicht. Von den insgesamt 15 durchgeführten Versuchen wurden nur 5 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

b) Versuchsperson J. (Tabelle 2, Abb. 4)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 11,3 mm Hg ($M = \pm 0,86$.)

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 13 Sekunden ($M = \pm 9,56$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 11,4 mm Hg ($M = \pm 0,47$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 21,6 mm Hg ($M = \pm 1,96$).

Der Ausgangsdruck wurde bei einem Mittelwert von 129 Sekunden ($M = \pm 27,1$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 20 durchgeführten Versuchen wurden nur 6 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

2. Die reaktive Hyperämie bei erwärmtem Unterarm

a) Versuchsperson H. (Tabelle 3, Abb. 5)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 12,1 mm Hg ($M = \pm 1,06$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 73 Sekunden ($M = \pm 9,64$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 13,3 mm Hg ($M = \pm 4,29$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 25,5 mm Hg ($M = \pm 1,23$).

Der Ausgangsdruck wurde bei einem Mittelwert von 96,6 Sek. ($M = \pm 14,8$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 10 durchgeführten Versuchen konnten nur 3 ausgewertet werden, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

b) Versuchsperson J. (Tabelle 4, Abb. 6)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 7,5 mm Hg ($M = \pm 0,5$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 151,5 Sek. ($M = \pm 1,44$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 16 mm Hg ($M = \pm 0,39$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 23,5 mm Hg ($M = 0$).

Der Ausgangsdruck wurde bei einem Mittelwert von 90 Sekunden ($M = \pm 10$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 5 durchgeführten Versuchen wurden nur 2 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert wieder erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

3. Die reaktive Hyperämie bei gekühltem Unterarm

a) Versuchsperson H. (Tabelle 5, Abb. 5)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 9,9 mm Hg ($M = \pm 0,83$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 111 Sekunden ($M = \pm 17,1$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 9,9 mm Hg ($M = \pm 14,8$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 20,1 mm Hg ($M = \pm 0,96$).

Der Ausgangswert wurde bei einem Mittelwert von 106 Sekunden ($M = \pm 13,2$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 10 durchgeführten Versuchen konnten nur 6 ausgewertet werden, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

b) Versuchsperson J. (Tabelle 6, Abb. 6)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 9,3 mm Hg ($M = \pm 1,78$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 113 Sekunden ($M = \pm 20,7$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 8 mm Hg ($M = \pm 2,14$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 17,3 mm Hg ($M = \pm 2,08$).

Der Ausgangswert wurde bei einem Mittelwert von 123 Sekunden ($M = \pm 29,9$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 5 durchgeführten Versuchen wurden nur 3

ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

4. Die reaktive Hyperämie bei erhobenem Arm

a) Versuchsperson H. (Tabelle 7, Abb. 7)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 12,3 mm Hg. ($M = \pm 0,63$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 60 Sekunden ($M = \pm 13,3$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 5,3 mm Hg ($M = \pm 1,5$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 17,6 mm Hg ($M = \pm 1,86$).

Der Ausgangswert wurde bei einem Mittelwert von 86 Sekunden ($M = \pm 10,6$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 6 durchgeführten Versuchen wurden nur 3 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

b) Versuchsperson J. (Tabelle 8, Abb. 8)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 12,75 mm Hg ($M = \pm 2,09$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 50 Sekunden ($M = 0$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 8,5 mm Hg ($M = \pm 2,42$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 21,25 mm Hg ($M = \pm 1,47$)

Der Ausgangswert wurde bei einem Mittelwert von 90 Sekunden ($M = \pm 11,7$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 4 durchgeführten Versuchen wurden nur 2 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

5. Die reaktive Hyperämie bei herabhängendem Arm.

Die aus diesen Versuchen resultierenden Kurven zeichnen sich gegenüber den bisher beschriebenen durch eine Besonderheit aus. Die Druckkurven fallen mit Einsetzen der Drosselung nicht sofort ab, wie das bisher der Fall war, sondern sie steigen zunächst wenige mm Hg an, um dann erst abzufallen. Der vorübergehende Druckanstieg wird verursacht durch Einpressen von Blut aus den Venen des Oberarms in diejenigen des Unterarms, welche infolge der Armlage schon prall gefüllt sind. Der höchste Punkt des Anstieges wurde als Nullpunkt gewählt.

a) Versuchsperson H. (Tabelle 9, Abb. 7)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 7,75 mm Hg ($M = \pm 22,4$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 165 Sekunden ($M = \pm 17,6$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 16,25 mm Hg ($M = \pm 3,66$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 18,5 mm Hg ($M = 0$).

Der Ausgangswert wurde bei einem Mittelwert von 37,5 Sekunden ($M = \pm 14,9$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 4 durchgeführten Versuchen wurden nur 2 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

b) Versuchsperson J. (Tabelle 10, Abb. 8)

Der Mittelwert des maximalen Druckabfalles betrug 11,1 mm Hg ($M = \pm 1$).

Der maximale Druckabfall wurde im Mittelwert nach 125 Sekunden ($M = \pm 23,2$) erreicht.

Der Mittelwert des Druckanstieges gemessen vom Ausgangswert betrug 20,4 mm Hg ($M = \pm 1,31$), gemessen vom niedrigsten Wert der Vorperiode 20,2 mm Hg ($M = \pm 2,45$).

Der Ausgangswert wurde bei einem Mittelwert von 70 Sekunden ($M = \pm 13,5$) wieder erreicht.

Von den insgesamt 6 durchgeführten Versuchen wurden nur 4 ausgewertet, in denen der Druck den Ausgangswert erreichte, d.h. in denen die Armlage während des Versuches unverändert blieb.

Tabelle 1

Versuche bei Zimmertemperatur und horizontaler Armlage in Herzhöhe (Vp.H.)

Kurve Nr,	2	4	5	9	10	Mittel- werte	Mittlerer Fehler des Mittelwertes (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung (Sek)	140	140	130	100	130	128	$\pm 7,5$
Drosselung							
Maxim. Druck- senkung in mm HG	14,5	13	13,5	11,5	9,5	12,4	$\pm 0,87$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang (Sek)	110	100	110	150	150	124	$\pm 10,8$
a) vom Ausgangs- wert	12,5	11	9	9,5	11,5	10,7	$\pm 0,82$
Reaktive Hyperämie							
Maxim. Druck- anstieg (mm Hg)							
b) vom niedrigsten Wert der Vorpe- riode	27	24	22,5	21	21	12,1	$\pm 1,14$

Mittelwert = arithmetisches Mittel

Mittlerer Fehler des Mittelwertes: $M = \frac{m}{n}$ Mittlerer Fehler der Einzelbeobachtungen: $m = \frac{m}{n}$

$$\sqrt{\frac{b - \frac{a}{n}}{n - 1}}$$

a = Summe der Differenzen der Einzelwerte zum Mittelwert

b = Summe der Quadrate der Differenzen der Einzelwerte zum Mittelwert

n = Anzahl der Beobachtungen

Tabelle 2

Versuche bei Zimmertemperaturen und horizontaler Anlage in Herzhöhe (Vp.J.)

Kurve Nr.	1	3	6	7	8	11	Mittel- werte	Mittlerer Fehler des Mittelwertes (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	145	140	110	110	110	170	131	$\pm 9,56$
Maxim. Drucksen- kung in mm / Hg.	10	11	10	12,5	11	13	11,3	$\pm 0,86$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	80	110	60	195	230	100	129	$\pm 27,1$
a) vom Ausgangs- wert ↑ Maxim. Druck- anstieg	8	3,5	8	12	11,5	13,5	11,4	$\pm 0,47$
b) vom niedrigsten Wert der Vorpe- riode	18	20,5	18	24,5	22,5	26,5	21,6	$\pm 1,96$

Tabelle 3

Versuche bei erwärmtem Unterarm und horizontaler Armlage in Herzhöhe (Vp.H.)

Kurve Nr.	3	4	5	Mittel- werte	Mittlerer Fehler des Mittelwertes (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	90	70	60	73	$\pm 9,64$
Drosselung					
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	10,5	13	13	12,1	$\pm 1,06$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	120	100	70	96,6	$\pm 14,8$
a) vom Ausgangs- wert $\uparrow$ Maxim. Druck- anstieg	16,5	11	12,5	13,3	$\pm 4,29$
b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode	27	24	25,5	25,5	$\pm 1,23$
Reaktive Hyperämie					

Tabelle 4

Versuche bei erwärmtem Unterarm und horizontaler Armlage in Herzhöhe (Vp.J.)

Kurve Nr.	1	2	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	153	150	151,5	$\pm 1,44$
Drosselung				
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	8	7	7,5	$\pm 0,5$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	80	100	90	± 10
a) vom Ausgangs- wert ↑	15,5	16,5	16	$\pm 0,39$
Maxim. Druck- anstieg				
b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode ↓	23,5	23,5	23,5	± 0
Reaktive Hyperämie				

Tabelle 5

Versuche bei gekühltem Unterarm und horizontaler Armlage in Herzhöhe (Vp.H.)

Kurve Nr.	2	3	4	6	7	9	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte(M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	150	65	120	110	80	140	111	$\pm 17,1$
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	12	9	11,5	6,5	11	9,5	9,9	$\pm 0,83$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	70	80	150	90	110	140	106	$\pm 13,2$
a) vom Ausgangs- wert Maxim. Druck- anstieg	7,5	8	8	11	8	17	9,9	$\pm 14,8$
b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode	19,5	17	13,5	17,5	19	16,5	20,1	$\pm 0,96$

Reaktive
Hyperämie

Tabelle 6

Versuche bei gekühltem Unterarm und horizontaler Armlage in Herzhöhe (Vp.J.)

Kurve Nr.	1	5	8	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	90	110	140	113	$\pm 20,7$
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	9,5	7	11,5	9,3	$\pm 1,78$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	80	130	160	123	$\pm 29,9$
a) vom Ausgangs- wert Maxim. Druck- anstieg	5	8,5	10,5	8	$\pm 2,14$
b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode	14,5	15,5	22	17,3	$\pm 2,08$

Tabelle 7

Versuche bei Zimmertemperatur und erhobenem Arm (Vp.H.)						
	Kurve Nr.	2	4	5	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte (M)
Drosselung	Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drücke- nung	50	80	50	60	$\pm 13,3$
	Maxim. Drucks- nung in mm Hg	12	12,5	12,5	12,3	$\pm 0,63$
Reaktive Hyperämie	Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	100	80	80	86	$\pm 10,6$
	a) vom Ausgangs- wert Maxim. Druck- anstieg	4	7,5	4,5	5,3	$\pm 1,5$
	b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode	16	20	17	17,6	$\pm 1,86$

Tabelle 8

Versuche bei Zimmertemperatur und erhobem Arm (Vp.J.)

Kurve Nr.	1	3	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	50	50	50	0
Drosselung				
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	12	13,5	12,75	$\pm 2,09$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	80	100	90	$\pm 11,7$
a) vom Ausgangs- wert ↑	8	9	8,5	$\pm 2,42$
Maxim. Druck- anstieg				
b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode	20	22,5	21,25	$\pm 1,47$
Reaktive Hyperämie				

Tabelle 9

Versuche bei Zimmertemperatur und herabhängendem Arm (Vp.H.)

Kurve Nr.	2	3	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	150	180	165	$\pm 17,6$
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	6	9,5	7,75	$\pm 22,4$
Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgang	25	50	37,5	$\pm 14,9$
a) vom Ausgangs- wert Maxim. Druck- anstieg	10,5	9	16,25	$\pm 3,66$
b) vom niedrigsten, Wert der Vor- periode	18,5	18,5	18,5	0

Reaktive
Hyperämie

Tabelle 10

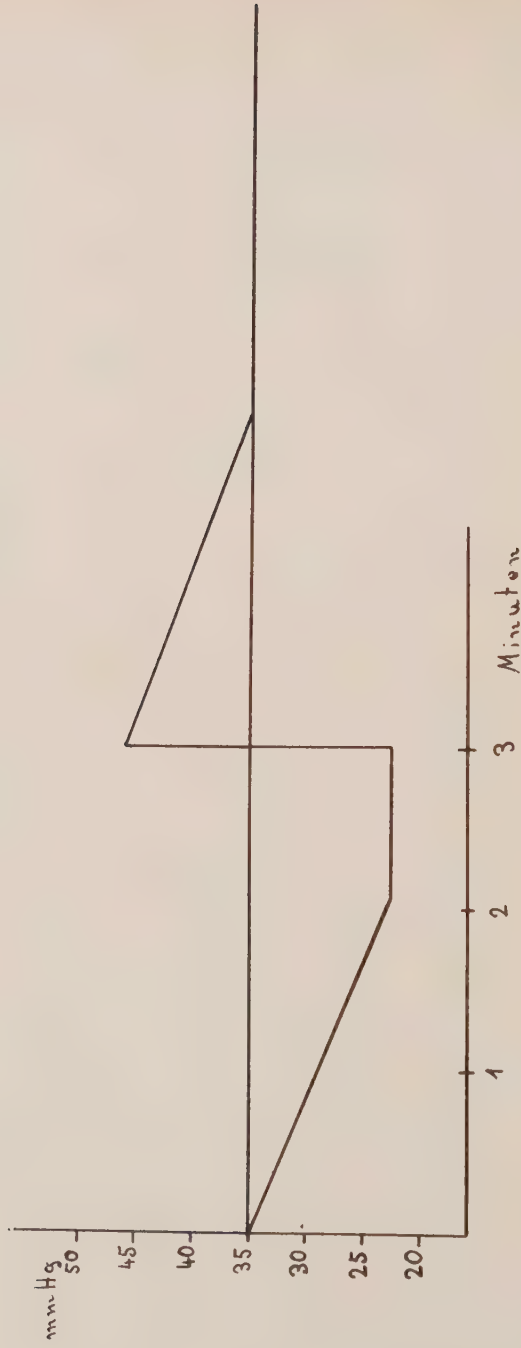
Versuche bei Zimmertemperatur und herabhängendem Arm (Vp.J.)

Kurve Nr.	1	4	5	6	Mittel- werte	Mittlerer Fehler der Mittelwerte (M)
Zeit bis zum Er- reichen der maxi- malen Drucksen- kung	110	130	120	140	125	$\pm 23,2$
Maxim. Drucksen- kung in mm Hg	12,8	9,9	9,5	12,5	11,1	± 1
Reaktive Hyperämie						
a) vom Ausgangs- wert ↑ Maxim. Druck= anstieg	13,7	5,1	9,5	8	20,4	$\pm 1,31$
b) vom niedrigsten Wert der Vor- periode	26,5	15	19	20,5	20,2	$\pm 2,45$

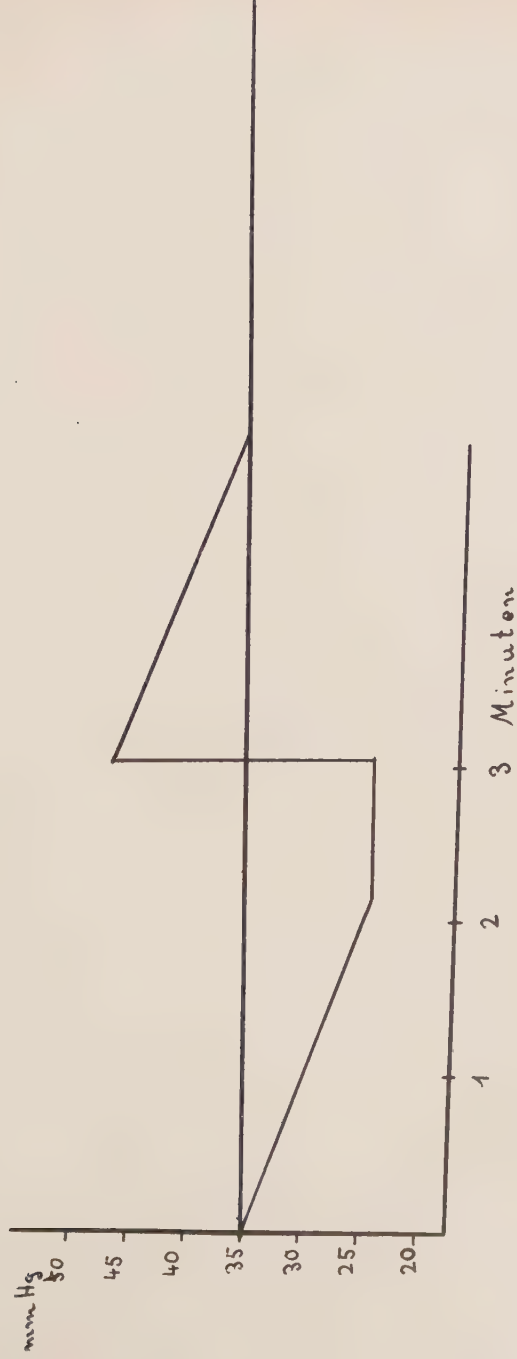
Tabelle 11

Die Mittelwerte der reaktiven Hyperämie (Druckanstieg vom Ausgangswert bzw. niedrigsten Wert der Vorperiode) von Vp.H. u. Vp.J. unter den verschiedenen Versuchsbedingungen.

	Versuche bei Zim- mertemperatur und horizontaler Arm- lage		Versuche bei erwärmtem Un- terarm und ho- rizontaler Arm- lage		Versuche bei ge- kühltem Unterarm und horizontaler Armlage		Versuche bei erhöhtem Arm und Zimmer- temperatur		Versuche bei herabhängendem Arm und Zimmer- temperatur	
	Vp.H.	Vp.J.	Vp.H.	Vp.J.	Vp.H.	Vp.J.	Vp.H.	Vp.J.	Vp.H.	Vp.J.
Druckanstieg vom Ausgangs- wert aus ge- messen	10,7	11,4	13,3	16	9,9	8	5,3	8,5	16,25	20,4
Druckanstieg vom niedrig- sten Wert der Vorperiode aus gemessen	12,1	21,6	25,5	23,5	20,1	17,3	17,6	21,25	18,5	20,2



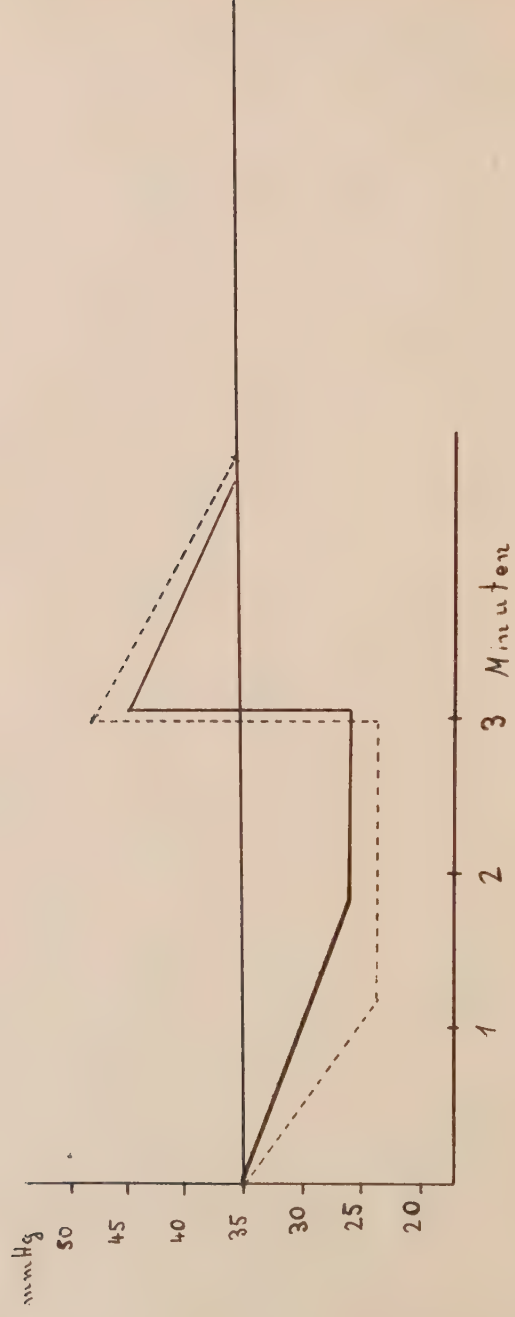
Versuche bei Zimmertemperatur und horizontaler Arm-lage
in Herz-höhe (Mittelwerts-Kurve)



Versuche bei Zimmertemperatur und horizontaler Arm-lage
in Herz höhe (Mittelwerts kurve)

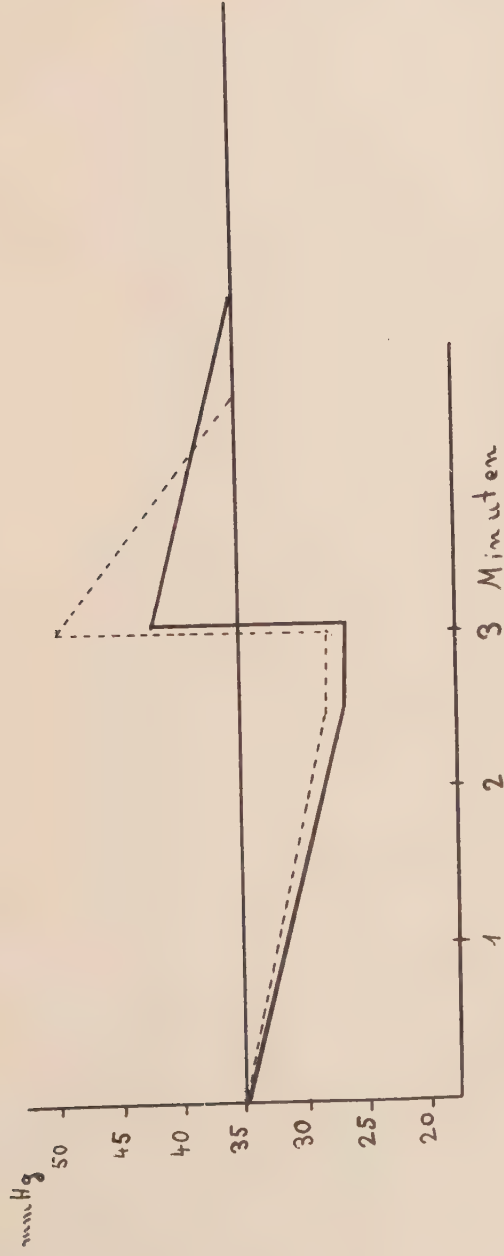
Abb. 5

Vp. H.



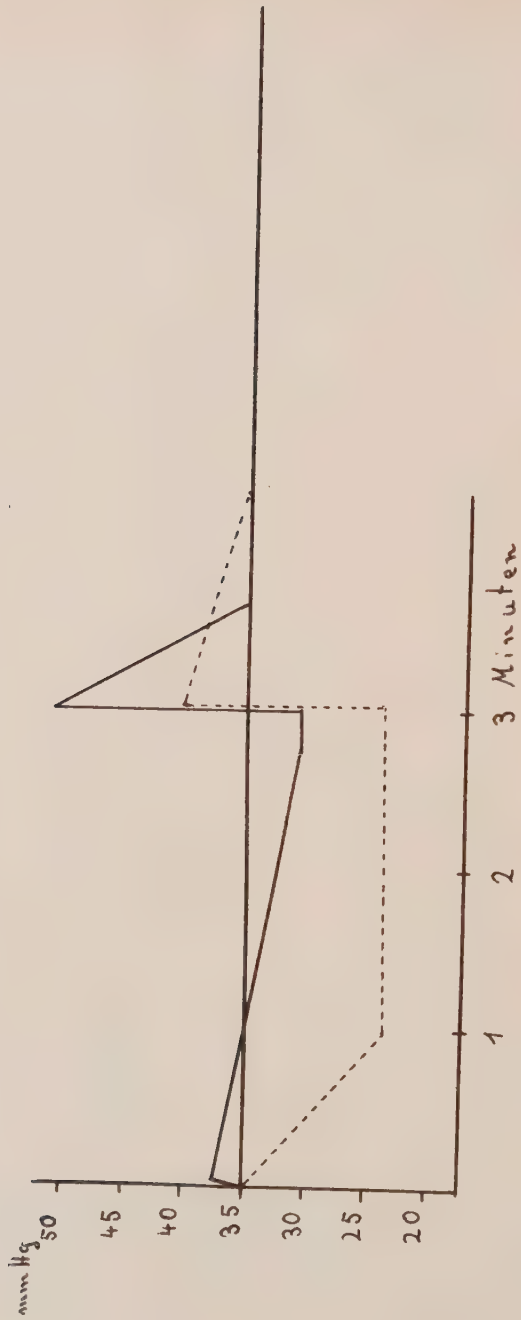
— = Arm gekühlt
----- = Arm erwärmt

Versuche mit Temperaturänderungen bei horizontaler Armlage in Herzhöhe (Mittelwertskurven)



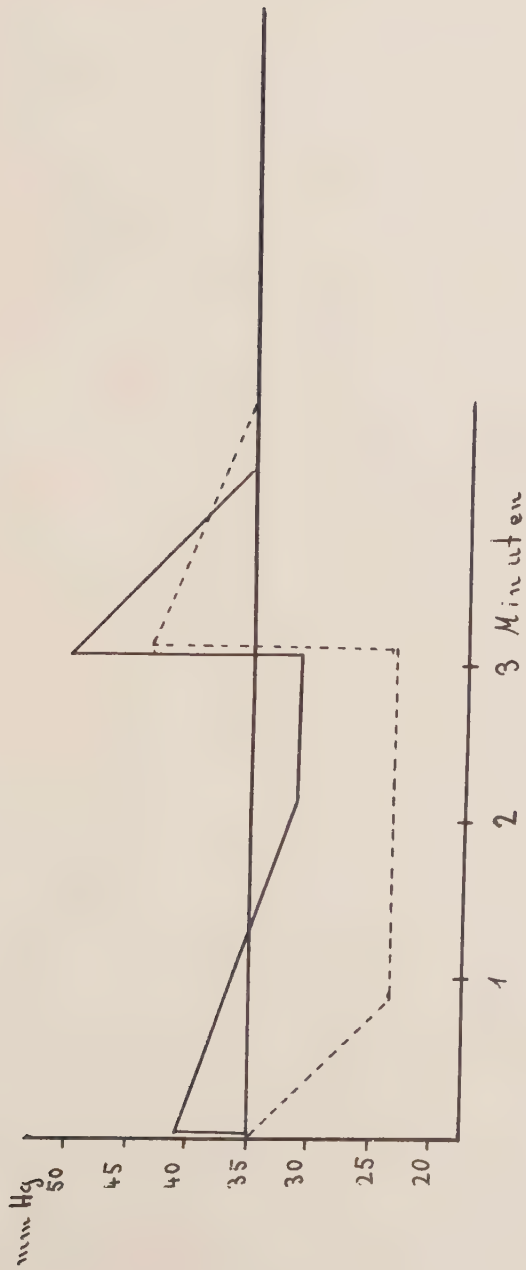
— = Arm gekühlt
 ---- = Arm erwärmt

Versuche mit Temperaturänderungen bei horizontaler Armlage in Herzhöhe (Mittelwertskurven)



— = Arm hängend
 ---- = Arm hochgestellt

Versuche mit Lageänderungen des Armes
 bei Zimmertemperatur (Mittelwertskurven)



— = Arm hängend

- - - = Arm hochgestellt

Versuche mit Lageänderungen des Armes

bei Zimmertemperatur (Mittelwerts Kurven)

D. B e s p r e c h u n g

Wie aus den mitgeteilten Versuchen hervorgeht, können mit der integrierten Kapillardruckmessung Änderungen der Funktion der versorgenden Muskelgefäße bereits in der Phase der Drosselung erkannt werden. Als Folge der unmittelbar mit der Drosselung einsetzenden Gefäßerweiterung fällt der registrierte Kapillardruck ab, weil das Blut unter der Wirkung des Entlastungsdruckes (35 mm Hg) aus den Gefäßen des eingeschlossenen Gewebsabschnittes in die sich erweiternden Gefäße des nicht eingeschlossenen Armgewebes abströmt. Diese Veränderungen der Gefäßfunktion können weder mit den Methoden der Venenverschlußplethysmographie noch der Messung der Wärmeleitfähigkeit erfaßt werden, die beide nur die unterbrochene Strömung anzeigen.

Bei den Normalversuchen (horizontale Armlage, Zimmertemperatur) erreicht der mit der Drosselung beginnende Abfall des Kapillardruckes im Mittel nach 128 Sek. (Vp.H.)/131 (Vp.J) Sek. den Minimalwert, d.h. nach dieser Zeit ist die unter den Versuchsbedingungen mögliche maximale Gefäßtonussenkung erreicht. Man sollte erwarten, daß die maximale Gefäßdilatation in der erwärmten Extremität wegen des erhöhten Stoffwechsels früher als in der normal temperierten oder abgekühlten Extremität zustande kommt. Diese Erwartung wurde aber in den eigenen Versuchen nicht erfüllt, weil wahrscheinlich die Temperatur des Muskelgewebes durch die relativ kurzzeitige (20 Min.) Wärme- bzw. Kälteeinwirkung auf die Haut der Extre-

mität nicht verändert wurde. Die Reihe dieser Versuche, die den Normalversuchen zugerechnet werden können, wurde deshalb nicht fortgesetzt.

Bei Lageänderungen der Extremität zeigen sich dagegen bemerkenswerte Unterschiede. Bei erhobenem Arm wird der Endwert der Drucksenkung im Mittel nach 60 (Vp. H.) / 50 (Vp.J.) Sek. und beim gesenkten Arm nach 165 (Vp.H.) / 125 (Vp.J.) Sek. erreicht. Der durch die Durchblutungs-drosselung ausgelöste Dilatationsimpuls trifft offensichtlich einmal auf ein schon erweitertes Gefäßsystem oder, auf Gefäße mit herabgesetzter Schwelle für Dilatationsimpulse, während beim gesenkten Arm ein kontrahiertes Gefäßsystem erst nach viel längerer Zeit erweitert werden kann.

Das unterschiedliche Verhalten der Gefäße bei gesenktem oder erhobenem Arm kann durch den B a y l i s s - Effekt erklärt werden. B a y l i s s (2) hatte 1902 gezeigt, daß eine Erhöhung des transmuralen Druckes eine Gefäßverengung und eine Senkung eine Gefäßerweiterung auslöst ("Autoregulation der Durchblutung"). Bei gesenktem Arm muß der transmurale Druck größer als bei erhobenem Arm sein, weil neben dem hydraulischen Druck noch ein beträchtlicher hydrostatischer Druckanteil auf die Arterienwand von innen einwirkt, während bei erhobenem Arm der hydraulische Druck um einen etwa gleich großen hydrostatischen Druckanteil vermindert ist. Bei gesenktem Arm muß also die Gefäßmuskulatur kontrahiert und die Zeit bis zur maximalen Dilatation während der Drosselung länger sein als bei erhobenem Arm, dessen Gefäße bereits dilatiert

sind. Nach Lösen der Drossel ist bei gesenktem Arm auch die Zeit bis zum Erreichen des Ausgangsdruckes deutlich kürzer als bei erhobenem Arm (Vp.H. 37,5 zu 86/Vp.J. 70 zu 90 Sek.). Neben der Ausschwemmung von Stoffwechselprodukten dürfte auch hier der höhere transmurale Druck bzw. der B a y l i s s - Effekt für die schnellere Rückkehr der Gefäße in den Ausgangszustand verantwortlich sein.

Die maximale Drucksenkung in mm Hg beträgt im Mittel bei der horizontalen Armlage in Herzhöhe bei Zimmertemperatur 12,4 (Vp.H.)/11,3 (Vp.J.), nach Erwärmung 12,1 (Vp.H.)/7,5 (Vp.J.), nach Abkühlung 9,9 (Vp.H.)/9,3 (Vp.J.), bei gesenktem Arm 7,8 (Vp.H.)/11,1 (Vp.J.), bei erhobenem Arm 12,3 (Vp.H.)/12,8 (Vp.J.), d. h. es bestehen nur relativ geringe Differenzen zwischen den Werten der einzelnen Versuchsreihen. Auch die Werte für den gesamten Druckanstieg nach Lösen der Drossel zeigen bei den verschiedenen Versuchsreihen nur kleine Unterschiede. Sie betragen im Mittel bei horizontaler Armlage in Herzhöhe bei Zimmertemperatur 23,1 (Vp.H.)/21,6 (Vp.J.) mm Hg, nach Erwärmung 25,5 (Vp.H.)/23,5 (Vp.J.) mm Hg., nach Abkühlung 20,1 (Vp.H.)/17,3 (Vp.J.) mm Hg., bei gesenktem Arm 18,5 (Vp.H.)/20,2 (Vp.J.) mm Hg, bei erhobenem Arm 17,6 (Vp.H.)/21,3 (Vp.J.) mm Hg. Diese Werte für den gesamten Druckanstieg sind methodisch besonders zuverlässig, weil die Druckänderungen innerhalb weniger Sekunden ablaufen, in denen die Druckwerte durch zufällige Lageveränderungen der Extremität kaum verfälscht werden können. Diese relative Konstanz der Werte für den gesamten Druckanstieg bedeutet, daß das Ausmaß der reakti-

⁺) Das Verhältnis der Differenz der arithmetischen Mittelwerte zum mittleren Fehler dieser Mittelwerte ist kleiner als 3.

ven Hyperämie von den (unter den Versuchsbedingungen erzielten) Temperaturveränderungen und Lageänderungen der Extremität unabhängig ist.

Ob die lokalen Temperaturänderungen die Muskelruhedurchblutung beeinflußt haben, ist ungewiß und erscheint - wie oben schon erwähnt - nicht wahrscheinlich. Durch die extremen Lageänderungen dürfte aber auf Grund der Untersuchungsergebnisse anderer Autoren (Wilkins (35) et al. Gaskeel and Burton (10), Roddie (31), Rosenzweig (32) die Ruhemuskeldurchblutung nicht konstant geblieben, sondern bei gesenktem Ar. vergrößert und bei erhobenem Arm verkleinert worden sein. Auf jeden Fall wird der Gefäßfunktionszustand in Abhängigkeit von der Lage verändert, wie aus den eigenen Befunden über die unterschiedlichen Zeiten der maximalen Drucksenkung während der Drosselung hervorgeht. Man darf daher vermuten, daß zwischen der Größe der reaktiven Hyperämie und der Größe der Muskelruhedurchblutung keine Beziehung besteht.

Dieses Resultat ist auch theoretisch auf Grund folgender Überlegung zu erwarten. Maßgebend für das Ergebnis der integrierten Kapillardruckmessung ist das Verhalten der nutritiven Kapillaren, weil ihre Masse ein Vielfaches der sonstigen im gemessenen Gewebe eingeschlossenen Gefäße (Arterien, Venen, Kurzschlußgefäße) beträgt. Dieses bedeutet, daß mit der Methode nur das Verhalten der nutritiven Kapillaren, also nur Änderungen der nutritiven Durchblutung erfaßt werden können.

Da die Größe einer Durchblutungsnot oder das Ausmaß der reaktiven Erweiterung nutritiver Kapillaren bei konstantem Sauerstoffbedarf der Gewebe nur von der Drosselungsdauer abhängen kann, darf man theoretisch erwarten, daß bei gleicher Drosselungszeit der mit der integrierten Kapillardruckmessung registrierte Druckanstieg immer gleich groß ist, da die reaktive Eröffnung und Erweiterung nutritiver Kapillaren immer gleich groß sein muß. Sie kann daher nicht abhängig sein von der Gesamtdurchblutung des ruhenden Muskels, welche (gemessen mit der Venenverschlußplethysmographie oder Wärmeleitsonde in einem zuführenden arteriellen Gefäß) neben der nutritiven noch die Kurzschlußdurchblutung (s.w.u.) enthält.

Auch die Arbeitshyperämie in der Unterarmmuskulatur ist - wie mit der Venenverschlußplethysmographie gezeigt werden konnte - in ihrer Größe unabhängig sowohl von der Extremitäten-temperatur (B a r c r o f t 1) als auch von der Größe der Ruhedurchblutung, die durch passives Anheben der unteren Extremitäten mit dem Stamm erhöht worden war. (D é a n und S k i n n e r 7).

G o l e n h o f e n und H i l d e b r a n d t fanden dagegen mit der Wärmeleitsonde, daß die reaktive Hyperämie (bei gleicher Drosselungszeit von 3 Minuten) von der Größe der Ruhedurchblutung abhängt und zwar bei hoher Ruhedurchblutung geringer als bei niedriger Ruhedurchblutung ist.

Eine endgültige Klärung dieser unterschiedlichen Befunde ist erst dann möglich, wenn geeignete Methoden zur Verfügung stehen, mit denen die Ruhemuskel-durchblutung in demselben Muskel-

gebiet quantitativ gemessen werden kann, in dem auch Änderungen des integrierten Kapillardruckes bei der reaktiven Hyperämie oder auch bei der Arbeitshyperämie erfaßt werden sollen. Grundsätzlich ist zu sagen, daß die Muskelruhedurchblutung mit den bisher gebräuchlichen Methoden, also mit der Venenverschlußplethysmographie und der Messung der Wärmeleitfähigkeit quantitativ nicht ermittelt werden kann.

Die Venenverschlußplethysmographie erfaßt in der gebräuchlichen Anwendung nicht nur die Durchblutungsgröße der Muskulatur sondern auch die der nicht unbeträchtlichen Hautmassen, welche in das Gerät mit eingeschlossen werden. Die mit der Wärmeleitsonde gemessene Wärmeleitzahl hängt ihrerseits von der zufälligen Lage der Sondenspitze im Muskelgewebe ab, welche durchschnittlich 9 mal (G o l e n h o f e n 13) verschoben werden muß, bevor man eine ausreichende Reaktion auf eine Durchblutungs-drosselung erhält.

Quantitativ zuverlässigere Werte der "Muskel"-Durchblutung im Haut-Muskelgebiet des Unterarmes können heute ohne Zweifel nur mit der Venenverschlußplethysmographie erreicht werden. Aber auch die mit dieser Methode erzielten Ruhedurchblutungs-werte streuen außerordentlich stark $1,8-9,6 \text{ cm}^3/\text{min}/100\text{cm}^3$ Gewebe = + 430 %, C o o p e r , E d h o l m und M o t t - r a m 6). Da die Muskulatur offensichtlich in der Ruhe auch mit 2 ccm auskommen kann, darf man vermuten, daß bei Muskelruhe die Differenz zum Maximalwert (etwa 7 ccm) eine "Luxus-durchblutung" darstellt, da sie im Augenblick (bei ruhender

Muskulatur!) nicht lebenswichtig ist. S c h r o e d e r (33, 34) nimmt an, daß es sich bei der "Luxusdurchblutung" um eine physiologisch wichtige Kurzschlußdurchblutung handelt. Aber auch eine hohe Kurzschlußdurchblutung hat vielleicht keinen Einfluß auf die Größe der reaktiven Hyperämie, wenn sich die auf Grund der eigenen Versuche geäußerte Vermutung durch Versuche mit erweiterter Methodik (gleichzeitige quantitative Durchblutungsmessung) bestätigen würde, daß die Größe der reaktiven Hyperämie nicht von der Größe der Ruhedurchblutung abhängig ist.

Neben den Befunden über die reaktive Hyperämie gestatten die vorliegenden Untersuchungsergebnisse einen Einblick in den maximal möglichen Kapillardruckanstieg. Wie bereits geschildert, nimmt der reaktive Druckanstieg als Maß der reaktiven Hyperämie mit Verlängerung der Drosselungszeit schnell zu und erreicht nach 3 Minuten ein Maximum, das bei noch länger dauernder Drosselung nur wenig überschritten wird. Der gesamte reaktive Druckanstieg bei einer Drosselungsdauer von 3 Minuten beträgt im Mittel 22,3 mm Hg und der Druckanstieg über den Ausgangswert im Mittel 10,5 mm Hg. Dieser Wert von 10,5 mm Hg dürfte auch der Änderung des Kapillardruckes bei maximaler Muskelarbeit (und konstantem Arteriendruck) gleichkommen. Die maximal mögliche Druckerhöhung in den nutritiven Kapillaren dürfte damit angenähert 10 mm Hg betragen. Vergleichswerte anderer Autoren über die möglichen Druckänderungen in den nutritiven Muskelkapillaren liegen bisher noch nicht vor.

E. Zusammenfassung

An 2 Versuchspersonen wurde der Einfluß von Temperatur- und Lageänderungen des Unterarmes auf die Größe und Dauer der Durchblutungsreaktion in der Unterarmmuskulatur nach 3-minütiger Durchblutungs-drosselung ("reaktive Hyperämie") mit der Methode der integrierten Kapillardruckmessung nach S c h r o e d e r (35) untersucht.

Die Untersuchungen haben ergeben, daß die Größe des reaktiven Druckanstieges weder durch Temperatur- noch durch Lageänderungen (in der benutzten Versuchsanordnung) beeinflusst wird. Der besonders durch Hoch- bzw. Tieflagerung der Extremität ausgelöste veränderte Gefäßfunktionszustand konnte an der Zu- bzw. Abnahme der Reaktionszeiten nachgewiesen werden. Da - wie von anderen Autoren nachgewiesen - auch die Ruhedurchblutung von Temperatur und Lageänderungen beeinflusst wird, wurde gefolgert, daß die Größe der reaktiven Hyperämie nicht von der Größe der Ruhedurchblutung abhängt und daß mit der Methode der integrierten Kapillardruckmessung nur der nutritive Anteil der Gesamtdurchblutung (= nutritive + Kurzschluß-durchblutung) erfaßt wird.

Der mittlere Druckabfall während 3-minütiger Drosselung betrug 10 mm Hg, der mittlere Druckanstieg nach Lösen der Drossel 20 mm Hg (= +10 mm Hg über den Ruhewert). Aus diesen Zahlen wurde gefolgert, daß der Druckanstieg in den Kapillaren bei maximaler Kapillarenerweiterung (z.B. bei Muskelarbeit) in der Größenordnung von 10 mm Hg liegt.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- (1) B a r c r o f t , H. and H. J. S w a n : Sympathetic control of human blood vessels. London 1953
- (2) B a y l i s s , W. M.: J. of Physiol. 28, 220-231 (1902).
- (3) B l a i r , D. A., W. E. G l o v e r , and J. C. R o d d i e : J. of Physiol. 148, 648-658 (1959).
- (4) C o l e s , D. R., and K. E. C o o p e r : J. of Physiol. 145, 241-250 (1958).
- (5) C o o p e r , K. E., and D. M c K e r s l a k e : J. of Physiol. 110, 24 (1949).
- (6) C o o p e r , K. E., O. G. E d h o l m and R. F. M o t t r a m : The blood flow in skin and muscle of the human forearm. J. of Physiol. 128, 258-267 (1955)
- (7) D e a n , H. M., and S. L. S k i n n e r : The effect of increased muscle blood flow on exercise hyperaemia in the human forearm.
The Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science. Volume XXXVIII (1960)
- (8) F o l k o w , B.: Acta physiol. scand. (Stockh.) 17, 289-310 (1949).
- (9) F o l k o w , B.: Acta physiol. scand. (Stockh.) 27, 99-117 (1953).
- (10) G a s k e l l , P., and A. C. B u r t o n : Local postural vasomotor reflexes arising from the limbs veins. Circulation Research, 1, 27-39 (1953)

- (11) G i b b s , F. A. : Proc. Soc. exp. Biol. (N.Y.)
31, 141 (19 33).
- (12) G o l e n h o f e n , K. und G. H i l d e b r a n d t :
Pflügers Archiv 264, 492-512 (1957)
- (13) K. G o l e n h o f e n : Die Wirkung von Adrenalin
auf die menschlichen Muskelgefäße. Verh. der dt.
Gesellschaft für Kreislaufforschung 25, 96-104 (1959).
- (14) G r a n t , R. T., and R.S.B. P e a r s o n :
Clin. Sci. 3, 119 (1938).
- (15) H e n s e l , H. und J. R u e f : Pflügers
Archiv 259, 267-280 (1954).
- (16) H e n s e l , H.: Klin.Wochenschrift, 45/46 Heft, (1956)
- (17) H e s s , W. R.: Die Regulierung des Blutkreislaufs
Leipzig 1930.
- (18) H o o k e r , D. R.: Amer.J. of Physiol. 108, 451-457,
(1912).
- (19) K e t y , S. S.: Amer.J. Med. Sci. 215, 352-(1948).
- (20) K e t y , S. S.: Amer. Heart J. 38, 321 (1949).
- (21) L e w i s , T.: The blood vessels of the human skin
and their reponses. London 1927.
- (22) L e w i s , T., and R. G r a n t : Heart (London)
12, 73-120 (1925)
- (23) M c G i r r , E. M.: Clin.Sci. 11, 91 (1952)

- (24) M i l l e r, H., and G.M. W i l s o n : Brit. Heart J. 13, 227 (1951).
- (25) R a n d a l, J.E., and S.S. H o r v a t h : Amer. J. of Physiol. 172, 391-398 (1953).
- (26) R e i n, H. und M. S c h n e i d e r : Pflügers Archiv, 239, 451-463 (1938).
- (27) R e i n, H.: Erg. Physiol. 32, 28-72 (1931).
- (28) R e i n, H.: Verh. der dt. Gesellschaft für Kreislaufforschung 14, 9-39 (1941).
- (29) R e i n, H.: Pflügers Archiv 248, 100-110 (1944).
- (30) R e i n, H.: Pflügers Archiv 248, 111-119 (1944).
- (31) R o d d i e, R.A.: The effect of the arm position on the oxygen saturation of the effluent blood. J. of Physiol. 127, 118 (1955)
- (32) R o s e n z w e i g, J.: The effect of the position of the Arm on the oxygen saturation of the effluent blood. J. of Physiol. 129, 281-288 (1955).
- (33) S c h r o e d e r, W.: Der physiologische Nachweis arteriovenöser Kurzschlüsse in der Skelettmuskulatur. Pflügers Archiv 273, 281-287 (1961).
- (34) S c h r o e d e r, W.: Kollaps-Symposium, Mainz 1962
- (35) S c h r o e d e r, W.: Eine einfache Methode zur fortlaufenden Registrierung der Haut- bzw. der Muskel-durchblutung des Menschen und des wachen Hundes (Capillardruckmessung). Zeitschrift für die gesamte experimentelle Medizin, 130, 513-522 (1959).

- (36) W i l k i n s, R.W., M.H. H a l p e r i n and
J. L i t t e r: The effect of the dependent position
upon blood flow in the limbs.
Circulation 2, 373-379 (1950).

Herrn Prof. Dr. S c h r o e d e r möchte ich für die
Überlassung des Themas sowie für seine wertvollen Ratschlä-
ge und Hinweise bei der Durchführung der Arbeit meinen
Dank aussprechen.

Lebenslauf

Am 30. 7. 1936 wurde ich als Sohn der Eheleute Otto Happel und Karolina Happel geb. Lenz in Frankfurt am Main geboren. Mit 6 Jahren besuchte ich in Frankfurt am Main die Volksschule. Im 10. Lebensjahr wurde ich in die Helmholtz-Oberrealschule umgeschult. 1954 siedelte ich nach Fritzlar über und besuchte das dortige Gymnasium, wo ich auch 1956 meine Reifeprüfung ablegte.

Im Frühjahr 1956 schrieb ich mich an der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main ein, um das zahnmedizinische Studium zu beginnen. Hier legte ich dann 1958 die zahnmedizinische Vorprüfung und 1961 das Staatsexamen ab. Zur Zeit bin ich als Assistent in einer zahnärztlichen Praxis tätig.

Frankfurt am Main, den 15. 5. 62

